

補助事業番号 28-121
補助事業名 平成28年度大気突入機周りの極超音速非平衡電離流れ場の特性解明
補助事業
補助事業者名 東海大学工学部機械工学科 山田剛治

1 研究の概要

<http://yamadalab.lab.u-tokai.ac.jp/>

本補助事業においては、極超音速衝撃波管により発生させた強い衝撃波により宇宙機周りの高温衝撃層電離流れ場を模擬し、衝突輻射理論とレーザー干渉法を融合させた総合的な解析を実施することで、非平衡電離流れの特性解明を行うものである。惑星大気突入を対象とする場合、気体分子を対象とするべきであるが、本補助事業では電離過程が分子に比べて単純なアルゴン原子を対象として特性解明を行った。

2 研究の目的と背景

近年、世界各国で様々な惑星探査ミッションが計画されており、実現に向けた研究開発が活発に行われている。将来的には、人類の宇宙空間での活動はより広範囲になることが期待される。このような状況において、地上と宇宙空間を自由自在に往来可能な宇宙輸送機の開発が必要となる。宇宙機は低速から超高速までの過酷な飛行条件を飛行する。特に大気突入飛行時には、強い空気力と空力加熱が発生するために、飛行環境を精度よく予測して機体開発を行う必要がある。そこで大気突入機周りで生じる流れ場の特性解明が求められている。本研究では、将来の深宇宙からの高速再突入飛行時に気体周りで支配的となる電離流れの特性解明に着目している。分子に比べて電離過程が単純なアルゴンを対象として、衝突輻射モデル及びレーザー干渉法を適用することで、電離状態や化学反応過程の詳細を明らかにし、電離流れ場の解析モデルを開発することを目的とする。

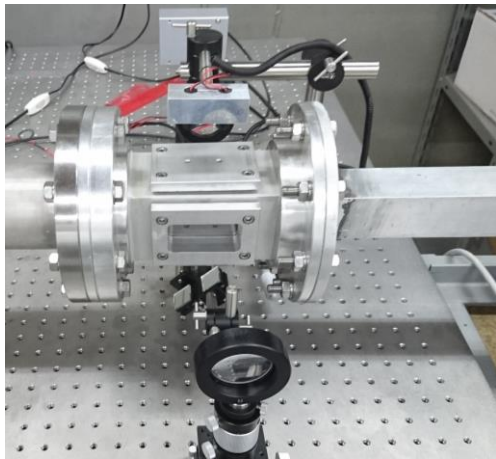
3 研究内容

(1) 衝突輻射理論による電離状態の解明

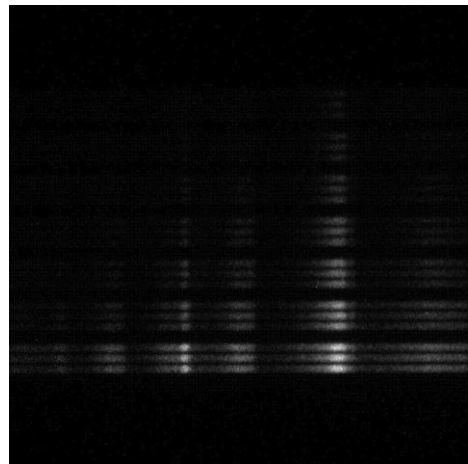
本研究では、アルゴン原子の特定の準位間の電子遷移のみを考慮した簡易衝突輻射モデルを利用して衝撃波によって誘起されたプラズマ中の電子温度を評価した。

(2) 分光計測システムの絶対強度校正及び絶対強度の空間分布特性

バンドル光ファイバを用いた多点イメージング分光計測システムを用いて衝撃波誘起プラズマの空間分布特性を取得した。



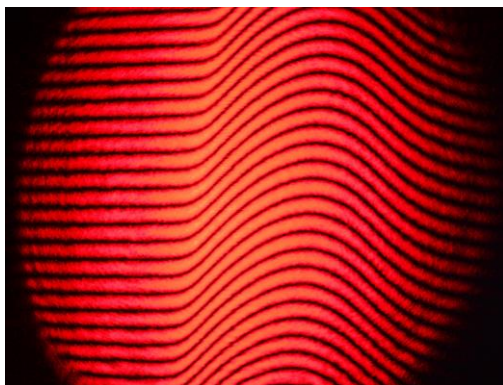
多点イメージング分光計測システム



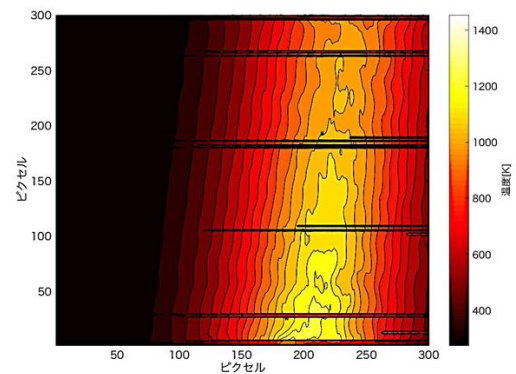
スペクトル空間分布特性

(3) レーザー干渉計による電離状態の解明

マッハツェンダー干渉法を構築して、炎の温度分布を取得した。



炎の干渉画像



炎全体の温度分布

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究を達成することで、直接的には大気突入機の飛行環境の解析技術が飛躍的に向上して、宇宙開発における大幅なコスト削減や安全性と信頼性向上が期待できる。そして人類の宇宙での活動範囲が拡大して、宇宙を利用した産業発展につながる事が予想される。宇宙開発以外にも、高精度なプラズマ診断技術が確立するために、プラズマ処理技術の向上及びプラズマを利用した新材料開発など他の分野への波及効果も期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本補助事業者はこれまでに、惑星大気突入機周りで生じる熱化学非平衡プラズマの特性解明に関する研究を行ってきた。研究の進展に伴い様々な計測手法やプラズマ診断技術を開発して様々な現象を明らかにしている。現在将来の深宇宙への惑星探査計画が世界各国で計画

されており、これまでよりも高速な再突入飛行技術を確認することが必要となる。超高速な再突入飛行時には機体周りのプラズマ流中では電離過程が支配的となるために、本補助事業において高速プラズマ中の電離過程の解明に着目して研究を行った。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

【学会発表】

1. Gouji Yamada, Takahiro Mizuguchi, Hiromitsu Kawazoe, Analysis of Nonequilibrium Argon Plasma based on a Collisional-Radiative Model, 11th International Workshop on Shock Tube Technology, June 29– July 1, 2016, German Aerospace Center, Gottingen, Germany.
2. 高橋千尋、山田剛治、衝突輻射モデルによるアルゴン衝撃波背後の電離状態の解明、第60回宇宙科学技術連合講演会、2016年9月6日–9日、函館アリーナ
3. Shin Takeuchi, Gouji Yamada, Hiromitsu Kawazoe, Optical Diagnostics of Shock-induced Argon Plasma based on a Simple Collisional-Radiative Model, The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, October 25–27, 2016, Toyama International Conference Center, Toyama, Japan.
4. 高橋千尋、山田剛治、プリカーサ現象を伴う衝撃波アルゴンプラズマの放射特性、平成28年度衝撃波シンポジウム、2017年3月8日–10日、ヴェルクよこすか

7 補助事業に係る成果物

- ・ 11th International Workshop on Shock Tube Technology発表論文

- ・ 第60回宇宙科学技術連合講演会発表論文

Analysis of Nonequilibrium Argon Plasma based on a Collisional-Radiative Model

Gouji Yamada¹, Takahiro Mizuguchi¹, Hiromitsu Kawazoe¹
¹Tokai University, Japan, ¹Tokai University, Japan
e-mail: gyamada@ipc.u-tohoku.ac.jp

Characteristics of nonequilibrium plasma around a space vehicle entering into a planetary atmosphere should be clarified for the accurate prediction of flight environment. Experimental and numerical studies have been carried out around the world to characterize nonequilibrium plasmas in early flight condition. As a result, some physical models for numerical analysis were developed and used for the prediction of flight environment. The validation of the models has been carried out for long time based on shock tube experiments to improve the prediction accuracy. One of the authors conducted shock wave radiation measurements in Ar using a shock tube. The result was compared with the numerical prediction of the two-temperature model proposed by Frank, showing that the discrepancy of the model for the relaxation process of internal states behind a shock wave is large. In addition, numerical analysis implied that precursor electrons were generated ahead of the shock wave and had a great influence of the relaxation process behind the shock wave. To understand the nonequilibrium processes behind a shock wave, shock tube experiments were conducted using argon as a test gas because argon had fewer energy modes than molecules had, simplifying the phenomenon. Triple probe measurements showed that precursor electrons and argon ions were mainly generated by the photoionization, making use of radiation energy behind a shock wave. In addition, spectroscopic measurements showed that the electron density tended to decrease behind the shock wave due to the radiative energy loss from the test gas. The energy loss is considered to be the energy source of the photoionization. These results pointed out the thermochemical state around the shock wave was out of equilibrium. Therefore, a numerical method based on local thermodynamic equilibrium (LTE) is not applicable to the argon plasma in the present condition.

In this study, we newly apply a collisional-radiative (CR) model to nonequilibrium argon plasma induced by a hypersonic shock wave. The purpose of this study is to investigate characteristics of nonequilibrium argon plasma induced by a hypersonic shock wave based on a collisional-radiative model. CR models deal with electronic transitions between all energy levels by taking into account elementary process. They are useful tool to diagnose nonequilibrium plasmas. Several collisional-radiative models for argon have been developed in past studies. The models consider different argon energy levels and elementary processes. The analytical forms proposed by Dineen are particularly well adapted for argon plasmas to deduce rate coefficient of electronic transitions. However, compared with the electro-impact processes from the ground state, cross section data available for electron impact transitions between excited levels are very scarce. In this study, we use a simplified CR model of the argon plasma in which the electronic transitions for a specific energy level is considered. In this CR model, the effective energy levels of argon atoms are divided into 67. The electronic transitions for the energy levels in 20 and in 7 are utilized to determine the electron temperature T_e and electron density N_e , respectively. These energy levels contain at least 80% of all the electronic transitions in the 67 energy levels. An example of the balance equation of the level $i = 20$, which is used to determine T_e , is shown in the following equation.

$$C_{10,20}N_{10} + F_{20,20}N_{20} + F_{20,20}N_{20} - F_{20,20}N_{20} - F_{20,20}N_{20} + C_{20,20}N_{20} + C_{20,20}N_{20} = 0 \quad (1)$$

where C_{ij} is the rate coefficient for electron-impact excitation from i to j level, F_{ij} is the rate coefficient for electron-impact de-excitation from j to i level. These rate coefficients are function of T_e , N_e is the population density of the i level. In above equation, population densities N_{10} , N_{20} , N_{20} and N_{20} are obtained by spectroscopic measurements of argon plasma. On the other hand, N_e is obtained using the balance equation of the level $i = 7$ as shown in the following equation.

$$N_e = \frac{A_{10,7}N_{10}}{[C_{10,7}N_{10} + C_{10,7}N_{10} + C_{10,7}N_{10} + C_{10,7}N_{10} + C_{10,7}N_{10} + C_{10,7}N_{10}]} \quad (2)$$

where A_{ij} is the radiative coefficient from i to j level. N_e of argon plasma can be obtained from above equation by inputting radiative coefficients, population densities and electron temperature T_e in this study. We obtain T_e and N_e of nonequilibrium argon plasma in a shock tube using these equation to clarify its characteristics.

第60回宇宙科学技術連合講演会発表論文
2016年9月6日–9日 函館アリーナ

75455-2016-0496

ID10 衝突輻射モデルによるアルゴン衝撃波背後の電離状態の解明

高橋千尋、山田剛治 (東海大学)

Analysis of ionization state of Argon Plasma behind a shock wave based on a Collisional-Radiative Model
Chihiro Takahashi and Gouji Yamada (Tokai University)

Key Word: Collisional-Radiative Model, Shock wave, Argon Plasma, Electron Temperature

Abstract

In this study, ionization process of argon plasma behind a shock wave is investigated using a collisional-radiative model. We newly apply the collisional-radiative model where elementary process are simplified and deduce the electron temperature behind a shock wave from the measured line spectra of argon. It is found that the electron temperature deduced from the model qualitatively agrees well with that obtained from CFD calculation, showing the validity of the model to diagnose nonequilibrium argon plasma behind a shock wave.

1. はじめに

探査機が惑星周軌道から地球大気へ再突入する速度は10km/s程度、早い再突入速度では機体の前方に強い衝撃波が形成し、機体は激しい空力加熱環境にさらされる。そこで、大気突入飛行時の機体特性を高精度で予測して機体設計を行う必要がある。現在、大気突入時の飛行環境の予測は数値流体力学(CFD)により行われている。予測への正確性は高いが、機体周囲のプラズマ状態を正確にモデル化することは、地上実験により、実験室での化学反応速度係数を調べ、モデルを検証し精度を向上させる必要がある。これまでの研究から、プラズマ電子の生成と電離過程については詳細なメカニクスが存在することが報告されている。完全解算プラズマでない場合、分子、原子、イオンが存在して電離過程より複雑になる。そこで本研究では、分子について詳細なメカニクスを単純化して電離過程の解析に取り組み、また実験室で生成されるプラズマ状態は、化学的に非平衡であり、従来の平衡状態仮定したプラズマの解析法を適用することができない。そこで本研究では、新たに衝突輻射モデルを提案し、電離過程解析の必要があることが判明している。さらに、全ての電離過程についての電離過程を考慮する、特定の電離過程のみを電離過程から電子温度と電子密度を算出できる電子-分子衝突モデル化したCRモデルが提案されている。このモデルでは、電子温度を算出する際は電子衝突過程が支配的かつ電離電位が可視光光

び自由電子から構成されている。放射線も圧縮管は色管で、圧縮管と低圧管は放射線の領域で知られている。放射管は44mmの矩形断面となっており、下流側は放射線が設置されている。放射管には、放射線が4枚設置されている。電離管後からの放射線の計測には過去の研究で開発された特性を高精度で予測して機体設計を行う必要がある。現在、大気突入時の飛行環境の予測は数値流体力学(CFD)により行われている。予測への正確性は高いが、機体周囲のプラズマ状態を正確にモデル化することは、地上実験により、実験室での化学反応速度係数を調べ、モデルを検証し精度を向上させる必要がある。これまでの研究から、プラズマ電子の生成と電離過程については詳細なメカニクスが存在することが報告されている。完全解算プラズマでない場合、分子、原子、イオンが存在して電離過程より複雑になる。そこで本研究では、分子について詳細なメカニクスを単純化して電離過程の解析に取り組み、また実験室で生成されるプラズマ状態は、化学的に非平衡であり、従来の平衡状態仮定したプラズマの解析法を適用することができない。そこで本研究では、新たに衝突輻射モデルを提案し、電離過程解析の必要があることが判明している。さらに、全ての電離過程についての電離過程を考慮する、特定の電離過程のみを電離過程から電子温度と電子密度を算出できる電子-分子衝突モデル化したCRモデルが提案されている。このモデルでは、電子温度を算出する際は電子衝突過程が支配的かつ電離電位が可視光光

3. CRモデル
プラズマ中で、原子-イオンの励起状態および電離状態の決定に数多くの電離過程が関係している。そこでCRモデルは、原子-分子のエネルギー準位の電離過程を詳細に考慮することで、励起電位密度から電子温度、電子密度を算出するプラズマの解析法である。本研究では、放射線も圧縮管と低圧管は放射線の領域で知られている。放射管には、放射線が4枚設置されている。電離管後からの放射線の計測には過去の研究で開発された特性を高精度で予測して機体設計を行う必要がある。現在、大気突入時の飛行環境の予測は数値流体力学(CFD)により行われている。予測への正確性は高いが、機体周囲のプラズマ状態を正確にモデル化することは、地上実験により、実験室での化学反応速度係数を調べ、モデルを検証し精度を向上させる必要がある。これまでの研究から、プラズマ電子の生成と電離過程については詳細なメカニクスが存在することが報告されている。完全解算プラズマでない場合、分子、原子、イオンが存在して電離過程より複雑になる。そこで本研究では、分子について詳細なメカニクスを単純化して電離過程の解析に取り組み、また実験室で生成されるプラズマ状態は、化学的に非平衡であり、従来の平衡状態仮定したプラズマの解析法を適用することができない。そこで本研究では、新たに衝突輻射モデルを提案し、電離過程解析の必要があることが判明している。さらに、全ての電離過程についての電離過程を考慮する、特定の電離過程のみを電離過程から電子温度と電子密度を算出できる電子-分子衝突モデル化したCRモデルが提案されている。このモデルでは、電子温度を算出する際は電子衝突過程が支配的かつ電離電位が可視光光

・ The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology 発表論文

・ 平成28年度衝撃波シンポジウム 発表論文

The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology
October 15-21, 2016, Yokohama, Japan

ASAP16-0204-02

Optical Diagnostics of Shock-induced Argon Plasmas based on a Simple Collisional-Radiative Model

By Shin TAKEUCHI¹⁾, Gyoji YAMADA²⁾, Chikizo TAKAHASHI³⁾ and Hiromitsu KAWAKAGE⁴⁾

¹⁾Department of Mechanical and Aerospace engineering, Tohoku University, Sendai, Japan
²⁾Department of Mechanical Engineering, Tohoku University, Kanagawa, Japan

In the present study, optical diagnostics of nonequilibrium argon plasma induced by a hypersonic shock wave are conducted based on a simplified CR model. Spectroscopic measurements show that line spectra of argon ions are very closely seen with line effect of ionization in the ion gas. The electron excitation population is deduced by applying the Boltzmann plot method to the measured line spectra of argon atoms. The result shows that the electron excitation population is much different from the Boltzmann distribution, indicating that the argon plasma is in thermomechanical nonequilibrium. Finally, by applying the CR model to the measured spectra, the spatial distribution of the electron temperature is obtained. The values of the electron temperature agree well with those of calculated one, showing the validity of the electron temperature evaluation using the CR model.

Key Words: Shock wave, Electron temperature, CR model, Argon plasma, Shock tube

1. Introduction

Characteristics of nonequilibrium plasmas around space vehicles entering into a planetary atmosphere should be clarified for the accurate prediction of flight environments. Experimental and numerical studies have been carried out around the world to characterize nonequilibrium plasmas in entry flight conditions. As a result, some physical models for numerical analysis were developed and used for the prediction of flight environments.¹⁾ The validation of the models has been carried out for long time based on shock tube experiments to improve the prediction accuracy. One of the authors conducted shock tube radiation measurements in N_2 using a shock tube.²⁾ The results were compared with the numerical prediction of the two-temperature model proposed by Park, showing that the discrepancy of the model for the relaxation process of internal states behind a shock wave. In addition, numerical analysis implied that precursor electrons were generated ahead of the shock wave and had a great influence of the relaxation process behind the shock wave.³⁾ To understand the thermomechanical nonequilibrium processes behind a shock wave, shock tube experiments were conducted using argon as a test gas because argon had fewer energy modes than molecules had, simplifying the phenomena. Triple probe measurements showed that precursor electrons and argon ions were mainly generated by the photoionization, making use of ionization energy behind a shock wave.⁴⁾ In addition, spectroscopic measurements showed that the electron density tended to decrease behind the shock wave due to the radiative energy loss from the ion gas.⁵⁾ The energy loss is considered to be the energy source of the photoionization. These results pointed out the thermomechanical state around the shock wave was out of equilibrium. Therefore, a conventional method based on local thermodynamic equilibrium (LTE) is not applicable to the argon plasma in the present condition.

In this study, we newly apply a collisional-radiation (CR) model to nonequilibrium argon plasma induced by a hypersonic shock wave to investigate the ionization process. CR models deal with electronic transitions between all energy levels by taking into account elementary processes. They are useful tool to diagnose nonequilibrium plasmas. Several CR models for argon have been developed in past studies.⁶⁻¹⁰⁾ The models consider different argon energy levels and elementary processes. In these models, the analytical forms proposed by Dawin are particularly well adapted for argon plasmas to deduce rate coefficients of electronic transitions between excited levels. However, compared with the electron-impact processes from the ground state, cross section data available for electron impact transitions between excited levels are very scarce. This is a drawback to apply the CR model to plasma diagnosis. In past studies, a simplified CR model was proposed for argon plasmas and the validity was examined by applying it to some kinds of plasmas.¹¹⁾ In this model, electronic transitions are considered for a certain energy level instead of all energy levels, simplifying the atomic processes in the CR model. We newly apply the simplified CR model to nonequilibrium argon plasma in the present study. The purpose of this study is to investigate characteristics of nonequilibrium argon plasma induced by a hypersonic shock wave based on the CR model.

2. Experimental setup

2.1. Shock tube facility

A five piston driven shock tube is used in this study to generate argon plasmas induced by a hypersonic shock tube. The shock tube facility consists of a high pressure reservoir, compression tube, low pressure tube containing the test section, and vacuum tank.¹²⁾ The total length of the shock tube

プリコーサ現象を伴う衝撃波アルゴンプラズマの放射特性

○高橋千希 (東海大学大学院), 山田剛治 (東海大学・工)

Radiation Characteristics of a Shock induced Argon Plasma with Precursor phenomenon

TAKAHASHI, Chikizo and YAMADA, Gyoji
Tohoku University, 4-1, Katahira, Sendai, Kanagawa, 259-1292, Japan

In this study, radiation characteristics of a shock-induced argon plasma are investigated by spectroscopic measurements. From the measured spectra, it is found that emission of argon ion is predominant in UV region. On the other hand, emission of argon atom is predominant in near infrared region. Time-resolved radiation of argon ion at 346 nm and argon atom at 763 nm are measured by a photomultiplier tube equipped by a spectroemeter. The measured time-resolved data are correlated with the distance from shock front. The result shows that argon ion starts to emit radiation at about 100 mm ahead of the shock wave, showing that argon ion is produced from argon atoms by photoionization reaction which is the main generation mechanism of precursor electrons. Argon atoms also emit radiation at about 50 mm ahead of the shock wave. This is considered to be due to the electronic excitation by radiation behind the shock wave and electron impact by precursor electrons. The present result has indicated that complicated chemical reaction processes occurred in the region ahead of the shock wave.

Key Words: Shock Wave, Argon Plasma, Radiation, Precursor Phenomenon, Spectroscopy

1. はじめに
宇宙機が惑星圏軌道から地球大気圏に再突入する速度は 10km/s を超える。高い再突入速度では地球の前方に強い衝撃波が生じる。機体直後には加速領域が形成され、そこで、大気分子の衝突力特性を高精度で予測して機体熱負荷を予測する必要がある。機体、大気再突入時の飛行環境の予測には数値流体工学(CFD)により行われている。本数値データの正確性は用いられる物理モデルの精度に依存する。地上実験により、衝撃波内の熱化学反応過程を調べ、モデルを検証し精度を向上させる必要がある。上述での研究から、砂塵(10km/s)を超音速再突入飛行時の複雑な電離過程の解明に衝撃波管実験により取り組んでいるが、数値計算による数値シミュレーションには数値熱伝導や電離反応なども取り入れる必要がある。本研究では、衝撃波管実験による数値シミュレーションに用いる物理モデルの精度向上を図るため、アルゴンプラズマの放射特性について測定したので得られた結果について報告する。

2. 実験装置及び方法
本研究では、アルゴン中に超音速衝撃波を生成するために自由ピストン駆動衝撃波管を用いた。本実験装置は、射撃管、圧縮管、低圧管、真空タンクおよび自由ピストン機構から成っている。射撃管は圧縮管は急激な圧縮で、圧縮管と低圧管は緩慢な減速でそれぞれ仕切られている。低圧管は4mmの喉径断面となっており、下流側に断面積が広げられている。断面積には、4枚の気流調整板が4枚設置されている。図1に射撃管の断面構成図を示す。本研究では、ファイバオプティックを用いた分光時間分解分光計システムと光電子増

倍管を用いた時間分解分光計システムを構築した。図2に示すように、ファイバ光路は7本のファイバ束が2mm間隔で配置されており、最も前方に平行に設置することで衝撃波と気体の同時観測が可能である。下流側のレーザ位置と空間位置の1点を合わせて観測することで、前述の時間分解分光計の分光特性の異なる複数のチャンネルを同時に観測することが可能である。また、観測データをリアルタイムで取り、観測結果を画像として表示することが可能である。また、観測結果の解析は、リアルタイムで行うことができる。本研究では、衝撃波管実験によるアルゴンプラズマの放射特性について測定したので得られた結果について報告する。

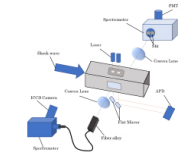


Fig. 1 Spectroscopic measurement system

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東海大学工学部山田研究室

(トウカイダイガクコウガクブヤマダケンキュウシツ)

住所: 〒259-1292

神奈川県平塚市北金目4-1-1

申請者: 専任講師 山田剛治 (ヤマダゴウジ)

担当部署: 工学部機械工学科 (コウガクブキカイコウガクカ)

E-mail: gyamada@tsc.u-tokai.ac.jp

URL: <http://yamadalab.lab.u-tokai.ac.jp/>